

Ole Soukup, Thomas Hanke, Peter Viebahn

Wärmedämmungs-Strategien im Haushaltssektor und ihr Beitrag zu Materialeffizienz und Emissions- minderung – eine Langfristanalyse bis zum Jahr 2050

Originally published as:

Ole Soukup, Thomas Hanke, Peter Viebahn (2012):

**Wärmedämmungs-Strategien im Haushaltssektor und ihr Beitrag zu Material-
effizienz und Emissionsminderung – eine Langfristanalyse bis zum Jahr 2050**

In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 36(1) 37–50

DOI: 10.1007/s12398-011-0072-y

Ole Soukup ^a, Thomas Hanke ^a, Peter Viebahn ^{a,*}

Wärmedämmungs-Strategien im Haushaltssektor und ihr Beitrag zu Materialeffizienz und Emissions- minderung – eine Langfristanalyse bis zum Jahr 2050

^a Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Germany

* Corresponding author: Peter Viebahn, Wuppertal Institute, Döppersberg 19, 42103 Wuppertal, Germany

E-mail: peter.viebahn@wupperinst.org

Phone: +49-202-2492306

Fax: +49-202-2492198

Zusammenfassung Eine oft kontrovers diskutierte Frage ist, ob eine massive Dämmung von Häusern in der Gesamtbilanz nicht mehr Ressourcenverbrauch und Emissionen verursacht, als sie im Endeffekt einspart. Zur Untersuchung dieser Frage wurde nun erstmals eine trade-off Analyse durchgeführt. Hierzu wurde ein bottom-up Wirkungsanalyse-Modell entwickelt, dessen Kern ein Emissions- und Energiemodell für den Haushaltssektor bildet, gekoppelt mit einem Ökobilanzierungs-Tool. Den Rahmen für beide Modelle bilden Energieszenarien bis 2050, die für jede Dekade Sanierungsraten und Energiemixe vorgeben. Damit können „reine“ Energieszenarien um ressourcenpolitische Analysen erweitert und die Auswirkungen verschiedener Dämmstrategien ermittelt werden.

Das zentrale Ergebnis der Modellierung ist, dass zusätzliche Aufwendungen für Dämmstoffe (untersucht wurden extrudierter Polystyrolhartschaum XPS und Zellulose) sowohl ressourcen- als auch emissionsseitig in fast allen Umweltwirkungskategorien durch erhebliche Einsparungen bei der Gebäudebeheizung überkompensiert werden. Im Wesentlichen sind keine Trade-offs erkennbar und der prozentuale Beitrag der Dämmstoffe an den Umweltwirkungsindikatoren ist gering. Relevant ist dagegen die Wahl des Treibmittels bei den aufgeschäumten XPS-Dämmstoffen: Gegenüber dem in Deutschland verwendeten XPS, das weitgehend mit CO₂ aufgeschäumt wird, führt ein Dämmstoff, der hohe Anteile an Fluorkohlenwasserstoffen aufweist, zu einem hohen Trade-off bezüglich der Wirkungskategorie „stratosphärischer Ozonabbau“ und zu einer erkennbaren, jedoch nicht so deutlichen Wirkung auf das Treibhaus-Potenzial. Eine Sensitivitätsanalyse mit dem alternativen Dämmmaterial Zellulose zeigt, dass sich die an sich schon geringen Anteile der Dämmstoffe an den Umweltwirkungsindikatoren weiter verringern. Hinsichtlich der Materialintensität sind XPS- und Zellulose-Dämmung jedoch mit vergleichbaren Auswirkungen verbunden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für beide Materialien ambitionierte Dämmstoffstrategien im Hinblick auf alle in dieser Studie analysierten Faktoren einen wesentlichen Beitrag sowohl zu Materialeffizienz- als auch zu Emissionsminderungszielen leisten können.

Thermal insulation strategies in the household sector and its contribution to material efficiency and reducing emissions - a long-term analysis up to 2050

Abstract An often controversial question is whether a massive insulation of houses in the overall balance does not cause more resource consumption and emissions than it saves in the end. To investigate this question, for the first time a trade-off analysis has been performed. For this, a bottom-up impact analysis model was developed, whose core forms an emissions- and energy model for the household sector which is coupled with a life cycle assessment tool. Both models provide the framework for energy scenarios to 2050, claiming for each decade refurbishment rates and energy mixes. Thus, "pure" energy scenarios can be extended by resource policy analyses and the effects of various insulation strategies might be determined.

The central result of modeling is that additional costs are compensated for insulating (extruded polystyrene foam XPS and cellulose were examined) both resource- and emission-side in almost all environmental impact categories with significant savings in building heating. Essentially, there are no trade-offs identified, and the percentage contribution of the insulating materials on the environmental impact indicators is low. In contrast, the choice of foaming agent in the foamed XPS insulation is relevant: Compared with the XPS used in Germany, which is largely CO₂ foamed insulation, one which has a high proportion of HFCs, leads to a

high trade-off regarding the impact category "stratospheric ozone depletion" and leads to a noticeable, but not significant effect on the global warming potential.

A sensitivity analysis with the alternative cellulose insulation material shows that the already low shares of the insulation continue to decrease with regard to the environmental impact indicators. However, with regard to the material intensity, XPS and cellulose insulation are associated with similar effects.

In summary, it can be stated that for both insulation materials ambitious strategies - with regard to all factors analysed in the study – can significantly contribute to material efficiency as well as to emissions reduction targets.

Keywords HEAT-Modell; Bedarfsfeld warmer Wohnraum; Umberto; bottom-up Modell; MaRess; Wärmedämmung

1 Ressourceneffizienz als neues Politikfeld

Der Energieverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen stehen immer mehr im Fokus der ökologischen Betrachtung und sind ein etablierter Bestandteil eines ökologischen, ökonomischen und sozialen Bewertungsmaßstabes. Dabei ist jedoch die Ressourcennutzung, und damit ein wesentlicher Teil von Technologie-Lebenszyklen, oft nur unzureichend untersucht. Lediglich die direkte Nutzungsphase, z.B. bei der Feuerung von Heizungsanlagen zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser, ist in der Vergangenheit in Modellrechnungen ausreichend berücksichtigt worden. Dagegen sind weder die Umweltbelastungen bei Produktion noch bei Entsorgung oder Recycling hinreichend erfasst. Die steigenden Preise an den Rohstoffmärkten erhöhen dabei weiterhin den Handlungsdruck auf Politik und Wirtschaft, eine Erschließung von Ressourceneffizienz-Strategien konsequent voranzutreiben.

Ziel des kürzlich beendeten Forschungsprojektes MaRess – Materialeffizienz und Ressourcenschonung (Hennicke et al. 2011) war es, in 4 Schritten substanzielle Wissensfortschritte zur Steigerung der Materialeffizienz und für die Ressourcenschonung zu erschließen. Erstens galt es, die *Potentiale der Ressourceneffizienzsteigerung* zu ermitteln, zweitens wurden *Ansätze für zielgruppenspezifische Ressourceneffizienzpolitiken* entwickelt und drittens wurden die gewonnenen neuen Erkenntnisse im Rahmen der Wirkungsanalyse untersucht und bewertet. Der vierte Baustein ist die *wissenschaftliche Begleitung der konkreten Umsetzung* und des *Agenda Setting* sowie die *Verbreitung der Ergebnisse*.

Als wesentlicher Bestandteil der Wirkungsanalyse im MaRess-Projekt wurde ein bottom-up Modell entwickelt. Ziel war es, anhand des Bedarfsfelds „Warmer Wohnraum“ beispielhaft zu analysieren, wie sich Politikansätze zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Summe auf die Ressourcen- und Umweltbilanz auswirken und mit welchem Erfolg sie umgesetzt werden könnten. In Kapitel 2 wird zunächst das Modellkonzept erläutert, das zur Analyse der langfristigen Auswirkungen entwickelt wurde. In Kapitel 3 folgt eine Beschreibung verschiedener Szenarien, anhand derer in einer Langfristbetrachtung bis zum Jahr 2050 analysiert wurde, welche Stoffströme in dem untersuchten Bedarfsfeld abhängig von unterschiedlichen Sanierungsstrategien anfallen würden. Kapitel 4 zeigt und erläutert die Modellierungsergebnisse hinsichtlich des Ressourceneinsatzes und seiner Umweltwirkungen. In Kapitel 5 werden Schlussfolgerungen aus der Studie gezogen und hierauf aufbauend Politikempfehlungen formuliert.

2 Modellkonzept

2.1 Ziele und Aufgabenstellung

Zur Analyse der langfristigen Auswirkungen des Bedarfsfelds „Warmer Wohnraum“ werden drei Untersuchungsebenen definiert:

- Durch die Entwicklung und beispielhafte Anwendung eines *Bottom-up Wirkungsanalyse Modells* wird es ermöglicht, sowohl die direkten als auch die indirekten Wirkungen eines im Rahmen des MaRess-Projektes identifizierten Policymixes zu ermitteln. Somit kann quasi eine „Netto“-Bilanzierung der aus verschiedenen Politikansätzen resultierenden Ressourcenströme durchgeführt werden, um sowohl direkte Wechselwirkungen als auch Trade-offs und Synergieeffekte zwischen betrachteten Maßnahmen zu ermitteln.
- Neben den Auswirkungen auf den Ressourcenbereich selbst werden gleichzeitig auch Wechselwirkungen mit anderen gesellschaftspolitischen Zielen (insbesondere den Klimaschutzzielen) analysiert. So ist angesichts klimapolitischer Vorgaben in Deutschland und der Europäischen Union zu untersuchen, ob Maßnahmen zur Verringerung der Ressourcenströme im Einklang mit den Reduktionszielen für Treibhausgas-Emissionen stehen. Weitere emissionsseitige Umweltwirkungsbereiche sind zum Beispiel der Sommersmog, die Versauerung und die Überdüngung von Böden und Gewässern oder die Belastung durch Feinstäube, die mithilfe eines *Ökobilanzierungs-Modells* ermittelt werden.
- Durch die Anwendung und Übertragung der im Energiesektor gängigen Szenarioanalyse wird es zudem möglich, die Auswirkungen verschiedener Ressourcenpolitikansätze im gleichen Bedarfsfeld zu modellieren und ihre Auswirkungen und Unterschiede gegenüberzustellen. Indem gleichzeitig nicht nur die Ist-Situation, sondern die Entwicklung auf der Zeitachse bis zum Jahr 2050 modelliert wird, können zudem *Langfrist-Auswirkungen* analysiert werden. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn – wie bei den analysierten Wärmedämmmaßnahmen im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ – die Auswirkungen von Ressourceneffizienzmaßnahmen einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten betreffen.

Die Erfahrungen bei der Modellierung des ausgewählten Bedarfsfeldes und der entwickelten Methodik werden schließlich hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Bedarfsfelder analysiert.

2.2 Das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ als Teil des Bedarfsfelds „Bauen und Wohnen“

Von verschiedenen in Frage kommenden Bedarfsfeldern wird das Bedarfsfeld „Bauen und Wohnen“ und hierin das Teil-Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ ausgewählt. Dieses Bedarfsfeld umfasst nach der hier vorgenommenen Definition die Nachfrage nach „Warmen Wohnraum“ in Deutschland. „Warmer Wohnraum“ kann mittels Heizungsanlagen auf fossiler und erneuerbarer Basis, mittels Stromheizung über fossilen Strom oder erneuerbare Energien oder auch durch energetische Optimierung (zum Beispiel Wärmedämmung von Gebäuden) erreicht werden. Neben dem Bestand an Wohnungen werden auch die Zu- und Abgänge bis zum Jahr 2050 betrachtet.

Für die Auswahl dieses Bedarfsfeldes sind verschiedene Gründe ausschlaggebend:

- Das Bedarfsfeld „Bauen und Wohnen“ ist hinsichtlich des direkten und indirekten globalen Materialaufwandes der inländischen sektoralen Produktion ein Hot-Spot Bereich (Acosta-Fernandez et al. 2009). Analysiert man zudem den Verbrauch der energetischen Ressourcen, so zeigt sich die herausragende Bedeutung des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“.
- Trotz der hohen Bedeutung des Gebäudebereichs für die Ressourcenfrage sind Ressourceneffizienzstrategien dagegen bisher eher rudimentär behandelt worden, so dass hier erstmals Energieeinsparstrategien und die dadurch ausgelöste Nachfrage nach Dämmstoffen gegenüber gestellt werden können.
- Maßnahmen zur Einsparung von Energie und Emissionen im Gebäudebereich gehen bisher implizit davon aus, dass keine negativen Trade-offs entstehen. Ob beispielsweise die Wirkung von Energiesparmaßnahmen möglicherweise durch die für die Herstellung der Dämmmaterialien benötigte Energie wieder aufgehoben wird, lässt sich in einer Überschlagsrechnung vergleichsweise einfach abschätzen. Welche Wechselwirkungen sich letztendlich aus energie- und prozessbedingten Emissionen in Hinblick auf unterschiedliche Umweltwirkungen ergeben, ist dagegen weniger offensichtlich und oft wesentlich von der Ausgestaltung der betrachteten Prozessketten abhängig. Durch die Kopplung eines Gebäude-Energiemodells mit einem Stoffstrommodell kann dies hier erstmals gezielt untersucht werden.
- Insbesondere durch den hohen Aufwand nicht-energetischer Ressourcen im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ ist zudem eine Analyse der Trade-offs zwischen eher energie- und emissions-getriebenen und stärker ressourceneffizienz-getriebenen Strategien interessant.
- Nicht zuletzt existiert für die in diesem Bereich relevanten Energieflüsse eine vom Wuppertal Institut entwickelte Bottom-up Methodik, die in dem stock-exchange Gebäudemodell *HEAT* umgesetzt wurde. Mit diesem Modell können sowohl Zubau und Abriss als auch Sanierung von Wohngebäuden, aggregiert zu 64 Gebäudetypen, hinsichtlich der benötigten Baumaterialien und des direkten Energieverbrauchs abgebildet werden. Der Stock-Exchange-Ansatz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die betreffenden Gebäudetypen bestandsorientiert geführt sind, d.h. dass die ermittelten Entwicklungen sich aus den Lebenszyklus bezogenen Abrissen, Neubauten und Bevölkerungsentwicklungen sowie Komfortexpectationen an den Wohnraum ergeben.

2.3 Das Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“

Zur Umsetzung der oben dargestellten Ziele wurde das im Folgenden beschriebene Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“ entwickelt. Abb. 1 zeigt die verschiedenen Module, aus denen das Modell aufgebaut ist.

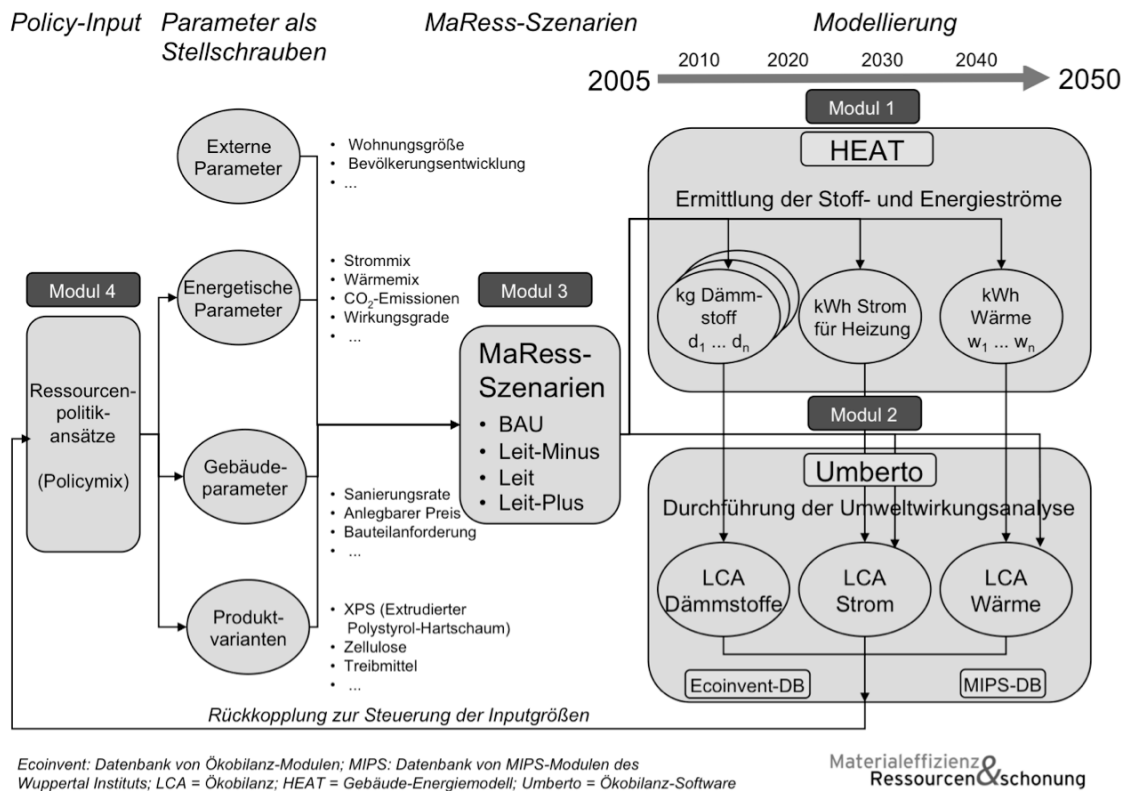


Abb. 1 Bottom-Up Wirkungsanalyse Modell für das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“

Modul 1: Modellierung des Bedarfsfelds „Warmer Wohnraum“ mit HEAT

Das EDV-System *HEAT* (Household Energy and Appliances modelling Tool) dient der Energie- und Emissionsbilanzierung und dem -monitoring im Haushaltssektor und enthält neben einer differenzierten Haushaltsgeräteseite zur Ermittlung des Strombedarfes auf der Wärmeseite eine bauteilspezifische Modellierung des Gebäudebestands Deutschlands. Sie lässt sich an regionale und datentechnische Anforderungen anpassen und kann in ihrer größten Ausprägung 64 Gebäudetypen differenzieren. (Hanke u. Fishedick 2004)

Innerhalb dieses Technologiemoells wird in einer Langfristbetrachtung bis zum Jahr 2050 für verschiedene Szenarien, die sich aus ressourcenpolitischen Vorgaben ableiten, die Entwicklung des Endenergiebedarfs für den Wohnungssektor modelliert, aufgeteilt nach Energiearten. Gleichzeitig wird die direkte Nachfrage nach Dämmstoffen ermittelt, wobei zum Beispiel bei der Berechnung von Dämmstoffmengen eine Auswertung der prognostizierten Anforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten von Gebäudehüllen erfolgt. Betrachtet wird der gesamte Gebäudebestand inklusive Zu- und Abgängen in Deutschland zu den jeweiligen Zeitpunkten 2005, 2010, 2020, 2030, 2040 und 2050.

Modul 2: Umweltwirkungsanalyse

Die mit *HEAT* berechneten Mengen aus jährlichem Mehraufwand an Dämmstoffen und jährlichem Endenergie-Einsatz in Heizungssystemen im gesamten Gebäudebestand werden anschließend in Stoff- und Energieflussmodelle eingespeist, die mit der Software Umberto erstellt werden. Zur Ermittlung ihrer Umweltwirkungen werden Ökobilanzen in Anlehnung an (DIN 2006a,b) erstellt.

Die Bilanzergebnisse werden schließlich einer Umweltwirkungsabschätzung unterzogen, wodurch eine ökologische Gesamtbewertung von eingesetzten Materialien und Energiemengen an Hand verschiedener Umweltwirkungsindikatoren und unter Berücksichtigung der jeweiligen Bereitstellungsvorketten möglich wird. Verwendet wird die CML-Methode³ (Guinée et al. 2002:63ff), die über eine breite internationale Anwenderschaft verfügt und sich dadurch auszeichnet, dass sie eine Vielzahl unterschiedlicher Beeinflussungen verschiedener Umweltmedien abdeckt. Diese beinhalten Wirkungskategorien auf der Emissionsseite und auf der Inputseite.

Emissionsseitig werden bilanziert: Überdüngungspotenzial, Versauerungspotenzial, stratosphärischer Ozonabbau, sedimentäre Süßwasser-Ökotoxizität, sedimentäre Seewasser-Ökotoxizität, aquatische Süßwasser-Ökotoxizität, aquatische Seewasser-Ökotoxizität, Boden-Ökotoxizität, photochemische Oxidation (Sommersmog), Klimawandel, ionisierende Strahlung und Humantoxizitätspotenzial.

Ressourcenseitig werden bilanziert: *Erschöpfung abiotischer Ressourcen* und *Landverbrauch*. Der Ressourcenindikator erfasst die Extraktion von mineralischen Rohstoffen und fossilen Energieträgern. Auf Grundlage ihres Verhältnisses zwischen jährlicher Extraktion und Ressourcenpotenzial („Ultimate Reserves“) wird ihr Erschöpfungspotenzial ermittelt, und im Rahmen der Charakterisierung auf die Referenzressource Antimon umgerechnet.

Diese beiden ressourcenseitigen Indikatoren liefern Hinweise auf die Belastung von Energie-, Material- und Flächenressourcen durch das Produktsystem, wobei 284 Elementarflüsse der Kategorie „Ressource“ bilanziert werden. Das Erschöpfungspotenzial berücksichtigt jedoch nicht den Gesamtumfang abiotischer und biotischer Ressourcenentnahme. Hierzu bedarf es der zusätzlichen Erfassung des „ökologischen Rucksacks“ über die Indikatoren MIPS⁴ bzw. TMR⁵ (einer der Hauptkategorien von MIPS). Da derzeit jedoch keine konsistente Bilanzierung unter Einbezug sowohl von Ökobilanz-Indikatoren als auch von MIPS-Indikatoren möglich ist, werden hier zunächst die Ökobilanz-Indikatoren verwendet. In einer Sensitivitätsanalyse werden an einem Fall ergänzend Materialintensitäten mit MIPS berechnet.

Modul 3: MaRess-Szenarien

Die Modellierung innerhalb von HEAT und Umberto basiert auf der Definition und Ausgestaltung verschiedener „MaRess-Szenarien“. Diese beschreiben – in einer Langfristperspektive – mögliche Entwicklungspfade zur Reduzierung des Energiebedarfs (und damit energetischer Ressourcen) des privaten Gebäudesektors. Die Szenarien spannen einen Fächer zwischen niedriger und sehr hoher (politischer) Eingriffstiefe auf. Sie sind zunächst am Instrumentarium der Energiemodellierung orientiert, da hier jahrzehntelange Erfahrung und konkrete politische Vorgaben beziehungsweise Absichtserklärungen vorliegen.

Modul 4: Policymix und Einflussparameter

Treiber für die verschiedenen Szenarien sind entsprechende Einflussparameter, die sich durch den Policymix einer Ressourcenpolitik ergeben. Diese auch als Stellschrauben be-

³ Benannt nach dem „Centrum voor Milieukunde“ in Leiden, das die Methode entwickelt hat.

⁴ MIPS = Material Input per Serviceeinheit

⁵ TMR = Total Material Requirement (Gesamtressourcenverbrauch)

zeichneten Größen bestimmen den Fächer an Szenarien, der eine Bandbreite möglicher Entwicklungen bis zum Jahr 2050 aufzeigt. Hierzu zählen

- *Externe Parameter:* Unter den allgemeinen betrachteten, nichtenergetischen Treibergrößen sind Rahmenindikatoren zusammengefasst, die eine allgemeine wirtschaftliche oder gesellschaftliche Entwicklung widerspiegeln und für alle Szenarien gleich gelten. Zu ihnen gehören etwa die demographische Entwicklung und die damit einhergehende Wohnflächenentwicklung, die Entwicklung der Bauteilstandards selbst (da die Güte der jeweiligen Standards innerhalb der Szenarien nicht variiert werden, sondern nur deren Marktanteile) sowie die Wirkungen von flankierenden Maßnahmen auf die Sanierungsraten.
- *Energetische Parameter:* Für alle MaRess-Szenarien werden Annahmen zur Entwicklung des Strommixes und des Wärmemixes in den Stützjahren getroffen. Der jeweilige Strommix wird im Stoffstrommodell dem direkten Strombedarf der Herstellung von Dämmstoffen sowie der Nutzung von Strom zu Heizzwecken zu Grunde gelegt. Der Wärmemix geht in die Bilanzierung der Herstellung von Wärme und Warmwasser in den Haushalten ein.
- *Gebäudeparameter:* Neben den Annahmen, die die Energieszenarien direkt betreffen, werden für jedes Szenario weitere Annahmen zur Modellierung der jeweiligen Energieverbräuche im Wohnsektor getroffen – wie etwa die zu erwartende Sanierungsrate im Gebäudebestand, Anforderungen an Bauteilbeschaffenheiten oder anlegbare Preise bezogen auf die Kosten von Sanierungsmaßnahmen.
- *Produktvarianten:* Zur Dämmung der Gebäudehüllen sind exemplarisch zwei Dämmmaterialien gewählt worden. XPS (Extrudierter Polystyrol-Hartschaum) ist als an Bedeutung gewinnender Ableger des Expandierten Polystyrol-Hartschaums (EPS) zu betrachten, da er alle günstigen bzw. verbesserten Wärmedämmeigenschaften (geringes Gewicht, Druckfestigkeit, geringere Wasseraufnahme) der EPS-Schäume aufweist. Im direkten Vergleich dazu wurde Zellulose als Vertreter der sogenannten ‚Naturdämmstoffe‘ ausgewählt, zu denen etwa auch Flachs, Hanf oder Schilfrohr gehören und die bei gleicher Dämmeigenschaft als Recyclingprodukt bzw. nachwachsender Rohstoff eine erhöhte Nachhaltigkeitseignung aufweisen können. Als weitere Sensitivitätsanalyse wird die Zusammensetzung der für die Herstellung des Dämmstoffs XPS benötigten Treibmittel modelliert. Generell können bei den Produktvarianten zukünftig in Produktionsprozessen zu erwartende Veränderungen (ausgelöst zum Beispiel durch technische Innovationen, durch Reduktion des Material- und Energieeinsatzes oder durch Substitution einzelner Produkte durch Ersatzstoffe) berücksichtigt werden.

Das Policymix-Modul 4 bekommt schließlich von Modul 2 über den zeitlichen Verlauf verschiedener Wirkungsindikatoren den Grad der Zielerreichung der ursprünglichen Politikansätze zurückgemeldet. Hierdurch wird es möglich, bei Verfehlen der Zielmarken die Politikansätze zu justieren und zu optimieren und die MaRess-Szenarien entsprechend anzupassen.

3 Definition und Implementierung der MaRess-Szenarien

3.1 Modellierungsansatz

Als methodische Grundlage für die Erstellung der MaRess-Szenarien wird die aus der Energiemodellierung bewährte Vorgehensweise verwendet. Deren zentrale Elemente sind

1. **Zielorientierung:** Definieren eines Langfristziels, das sich aus einem oder mehreren Zielgrößen zusammen setzt – prominente Beispiele sind die seit Jahren erstellten Energieszenarien, die beispielsweise in der Variante E1 des Leitszenarios 2008 (BMU 2008) das Ziel einer 80-prozentigen Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 betrachten;
2. **Szenarienfächer:** Entwickeln einer Schar von Langfrist-Szenarien, die Entwicklungspfade zum Erreichen der gesetzten Zielgrößen aufspannen oder zeigen, wie und in welchem Ausmaß die Ziele verfehlt werden. Solche Szenarien spannen meist einen Fächer zwischen niedriger Eingriffstiefe (BAU = business-as-usual Pfad) und hoher Eingriffstiefe (mit Auswirkungen bis hin zum Systemwechsel) auf.

Als Grundlage für die quantitative Modellierung denkbarer Zukunftsentwicklungen wird der Rückgriff auf bestehende klimapolitische Ziele und Szenarien vorgenommen. In gängigen Szenarien aus diesem Sektor, wie etwa der Variante E1 des Leitszenarios 2008 (BMU 2008), wird in der Regel eine Begrenzung der energiebedingten CO₂-Emissionen in Deutschland um 40% bis zum Jahr 2020 gegenüber 1990 und um 80% bis zum Jahr 2050 modelliert. Diese Ziele werden in neueren Szenarien oft noch verschärft und liegen z.B. im Innovationsszenario nach Öko-Institut und Prognos (2009) bei -91% bis 2050.

Der ursprünglich geplante, umfassendere Ansatz, auch Ressourcenpolitik-Optionen mit einzu-beziehen, konnte nicht weiter verfolgt werden, da für die Szenarienentwicklung nicht ausreichend quantifizierbare und fortschreibbare Instrumente vorhanden waren. Von den in anderen Arbeitsbereichen von MaRess identifizierten Instrumenten wären eine Baustoffbesteuerung und ein Ressourcenausweis für Gebäude verfügbar gewesen. Ersterer berücksichtigt jedoch nur Primärbaustoffe, während in der vorgelegten Studie Dämmstoffe modelliert werden; letzterer wird aufgrund der großen Unsicherheit hinsichtlich der anzusetzenden Werte nicht weiter betrachtet. Auch ohne Einbezug konkreter Ressourcenziele sind die zu Grunde gelegten Szenarien dennoch von hoher Relevanz für die in MaRess verfolgten Ziele:

- Durch den Energiebedarf in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr wird eine große Menge endlicher energetischer Ressourcen (Primärenergie) verbraucht, so dass eine Betrachtung dieser Sektoren nicht nur aus klimapolitischen, sondern ebenso aus ressourcenpolitischen (und sicherheitspolitischen) Gründen äußerst relevant erscheint;
- bisher existieren keine Abschätzungen über mögliche Trade-offs zwischen Energieeinsparung und gesamtem Rohstoffverbrauch, so dass die Kopplung eines Gebäude-Energiemodells mit einem Stoffstrommodell die Möglichkeit gibt, dieses erstmals gezielt zu analysieren.

Vor diesem Hintergrund werden im folgenden Kapitel die MaRess-Szenarien für das Bedarfswelt „Warmer Wohnraum“ beschrieben, die auf entsprechenden Energieszenarien aufbauen.

3.2 Beschreibung der MaRess-Szenarien

Als Grundlage der Szenarienerstellung wird die *Leitstudie 2008* des Bundesumweltministeriums ausgewählt. Basis der Leitstudie ist das zielorientierte *Leitszenario 2008*, das darlegt, wie die energiebedingten CO₂-Emissionen bis 2050 in Deutschland auf rund 20% des Werts von 1990 gesenkt werden können (BMU 2008). Es bildet die Zwischenziele der Bundesregierung für 2020 ab, die in Beschlüssen der Bundesregierung, einschlägigen Gesetzen und den Regelungen der EU-Kommission festgelegt wurden. Dies betrifft Festlegungen für die Reduktion

der CO₂-Emissionen, die Steigerung der Energieproduktivität und den Beitrag der erneuerbaren Energien, die einen entsprechenden Strukturwandel in der Energieversorgung auslösen. Aus den Energieszenarien wird für die Modellierung sowohl der jeweilige Wärmemix im Haushaltsbereich als auch der bundesweite, durchschnittliche Strommix verwendet.

Zur Darstellung der Technologieverteilung im Wärmemix werden 15 Heizungssysteme berücksichtigt, darunter Zentralheizungen, Etagenheizungen und Einzelöfen (je nach Typ betrieben mit Öl, Gas, Kohle, Elektrizität, konventioneller Fern- oder regenerativer Nahwärme) sowie Effizienztechnologien (Wärmepumpen, Brennwertkessel, solarthermische und biomassebefeuerte Anlagen).

Die allen Szenarien der Leitstudie zugrunde liegenden ökonomischen und sonstigen Basisdaten (zum Beispiel Entwicklung der Bevölkerung und der Haushaltsgrößen) werden leicht angepasst. Insbesondere die ökonomischen Daten werden aufgrund der Wirtschaftskrise nach unten korrigiert.

Ergänzend zu den Basisannahmen auf energetischer Seite werden in den MaRess-Szenarien weitere Einflussparameter bzw. Treibergrößen (siehe Modul 4) zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen im Wohnungsbereich festgelegt, anhand derer mittels *HEAT* die Nachfrageseite modelliert wird. Sie sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Die Angaben in der Zeile ‚Anlegbarer Preis‘ beziehen sich auf den Punkt, der einen Gleichgewichtspreis zwischen Kosten der Energieeinsparung und Kosten für den jeweiligen Brennstoff bedeuten würde. Alle Einsparkosten, die demnach unterhalb des anlegbaren Brennstoffpreises liegen, sind als betriebswirtschaftlicher Vorteil zu bewerten.

Tab. 1 Zusammenfassende Darstellung der Einflussgrößen im Gebäudebereich nach Szenarien

Einflussgröße	Szenarien			
	MaRess BAU	MaRess Leit-Minus	MaRess Leit	MaRess Leit-Plus
Zielvorgaben				
• Leitstudie 2008	a. Endenergie b. Erneuerbare	a. Endenergie b. Erneuerbare	a. Endenergie b. Erneuerbare	---
• Sonstiges				Ergebnisorientiert Vollsanierung bei Ausschöpfung der Potenziale der er- neuerbaren Energien aus dem Leitszenario
Leitindikatoren der Nutzenenergieebene (Gebäudeeffizienz)				
Sanierungsrate	Residuum bis < 0,7% p.a. Derzeitiger Sanie- rungsrate bei der Umsetzung von Wärmetechni- schen Maßnah- men an der Ge- bäudehülle	Residuum bis < 0,7% p.a.	Residuum < 1,5% p.a. Forcierung flankie- render Maßnahmen (Energieberatung Energiepass, KfW)	< 2,5% p.a. Maximale Umset- zung (Vollsanierung)
Anlegbarer Preis		Residuum bis < 4,4 ct/kWh	Residuum bis < 6,7 ct/kWh	8,8 ct/kWh Orientierung an zu- künftige Preisent- wicklung der Ener- gieträger
Amortisations- Erwartung		< 4 Jahre Gewinnerwartung von Investitionen bei Haushalten	< 10 Jahre Mittlere Gewinner- wartung (Banken- praxis)	< 15 – 20 Jahre Orientierung an Le- benszyklen von Bau- teilerneuerungen
Bauteilanforde- rung (Altbau)	EnEV 2009 (Energiespar- verordnung)	EnEV 2009	-15% HT' (Mittlerer Heizwärmebedarf) (zur Basis EnEV 2009)	Schrittweise Ver- schärfung ab 2020 bis 2050 zum Pas- sivhaus
Neubau bis 2020 2020 – 2050		Residuum -15% HT'	Residuum - 80% HT'	- 80% HT' Passivhaus
Leitindikator(en) der Endenergieebene (Heizungsanlagenmix/-effizienz)				
Potenziale er- neuerbare Ener- gien	VORGABE der Referenz- Entwicklung	VORGABE aus dem Leitszenario (D1 verminderte Effizienz)	14,8% der Wärmenachfra- ge 2020 (ohne Wärmestrom)	Absolut-Werte aus Leitszenario
Technischer Fortschritt (spez. Nutzungsgrad)	Business-As- Usual	Business-As- Usual	Business-As-Usual	Business-As-Usual

Szenario **MaRess BAU**

Zur Darstellung, welche Beiträge das *Leitszenario 2008* für die Klimaschutz- und Ressourcenziele liefert, ist es sinnvoll, zunächst eine Referenzentwicklung zu modellieren. Da in der *Leitstudie 2008* zielorientierte Szenarien entwickelt wurden, denen keine solche Referenz-Entwicklung gegenübergestellt wurde, muss zunächst ein eigenes Business-As-Usual-Szenario (BAU) entwickelt werden. Hierfür wird auf die Referenzszenarien der Energieprog-

nose (IER et al. 2009) und der WWF-Studie „Modell Deutschland“ (Öko-Institut und prognos 2009) zurückgegriffen.

Hinsichtlich der Wärmedämmung bestehen spezifische Zielvorgaben nur insofern, als dass bis zum Jahr 2020 nur eine geringe Verschärfung der zu Anfang 2009 geltenden Energiesparverordnung um abzüglich 15% auf den HT'-Wert (HT = baukörperbezogener mittlerer Transmissionswärme-Kennwert) vorgenommen wurde. Auch bis zum Jahr 2050 werden lediglich Effizienzmaßnahmen umgesetzt, die im Bereich des Trendsparens liegen.

Szenario *MaRess Leit-Minus*

Das Szenario *MaRess Leit-Minus* entspricht dem *Defizitszenario D1* der *Leitstudie 2008*. Dabei wird einerseits angenommen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien wie geplant erfolgt, sich die erzeugte Menge an Strom und Wärme in absoluten Mengen gegenüber dem *Leitszenario 2008* also nicht verändert. Demgegenüber wird jedoch eine geringere Wirkung der Maßnahmenpakete zur Effizienzsteigerung und zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung angenommen. Dadurch erhöht sich die Energienachfrage, so dass der Anteil der erneuerbaren Energien relativ gesehen sinkt.

Weiterhin wird unterstellt, dass gegenüber Trendbedingungen in deutlich erhöhtem Umfang Effizienztechniken zur Anwendung kommen – sowohl auf der Nachfrageseite als Wärmedämmsysteme als auch auf Angebotsseite als „technisch-verbessertes“ Heizungssystem differenzierbare Effizienztechnik. Als erweiterter Eingriff kommen zusätzlich Maßnahmen im Bereich der erneuerbaren Energien zum Einsatz. Schließlich werden die Bedingungen zur Umsetzung wärmetechnischer Maßnahmen erweitert, so dass es zu einer leichten Zunahme der Umsetzungsraten kommt.

Szenario *MaRess Leit*

Das Szenario *MaRess Leit* entspricht dem *Leitszenario 2008*, das bereits oben beschrieben wurde. Hinsichtlich der Wärmedämmung wird ein Zukunftspfad vorgegeben, der die maßgeblichen Ziele einer nachhaltigen Entwicklung des Energiesystems erfüllt. Konkret bedeutet dies eine Reduzierung von HT' um 80% für den *Altbau* und einer Passivhausvorgabe für den *Neubau* ab dem Jahr 2020.

Szenario *MaRess Leit-Plus*

MaRess Leit-Plus unterscheidet sich von *MaRess Leit* dadurch, dass die Effizienzbemühungen im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ noch weiter *gesteigert* werden, indem der Heizenergiebedarf weiter abgesenkt wird. Die Zusammensetzung des Wärmemix wird vereinfacht konstant gehalten, so dass sowohl fossile als auch erneuerbare Wärmeträger in absoluten Mengen sinken.

Um die jeweiligen kombinierten Effekte der Szenarien auf ihre Einzelwirkungen zu untersuchen, bietet es sich an, innerhalb von Sensitivitätsrechnungen Einzeleffekte zu isolieren, um deren Wirkungen gegenüber den anderen abzuschätzen. Die *MaRess*-Szenarien sind daher um eine weitere Variante erweitert worden: Da die Potenziale der erneuerbaren Energien im Szenario *MaRess Leit* technologisch und infrastrukturell im Energiesystem umgesetzt sind, bietet es sich an, diese absoluten Mengen auch in einem verschärften Szenario mit reduziertem Heizenergiebedarf zu verwenden. Die Übertragung der absoluten erneuerbaren Energie-

potenziale aus dem Szenario *MaRess Leit* ergibt einen anteilmäßig höheren „Erneuerbare“-Anteil, in Relation zur Wärmenachfrage im Szenario *MaRess Leit* von rund 16%.

Trotz der Einbeziehung erweiterter technischer Lösungen zur Reduzierung des Nutzenergiebedarfes sind im Szenario *MaRess Leit* und *MaRess Leit-Plus* lediglich Maßnahmen abgebildet, die unterhalb eines anlegbaren Preises von 6,7 ct/kWh Einsparung (*MaRess Leit*) sowie unter 8,8 ct/kWh (*MaRess Leit-Plus*) liegen. Bei derzeitigen Wärmepreisen von um 6-7 ct/kWh und deren Steigerungsraten in der Zukunft können die umgesetzten Maßnahmen in beiden Fällen als realistische wirtschaftliche Grenzkostenannahme betrachtet werden.

Im Hinblick auf die Analyse und Bewertung der mit der Umsetzung der verschiedenen Zukunftspfade verbundenen Anstrengungen ist es sinnvoll, die gewählte Aufteilung der Szenarien weiter zu verfeinern. Als zusätzliche Gliederungselemente werden die energiepolitische *Umsetzungsintensität* sowie die Notwendigkeit zur Durchführung strukturverändernder Maßnahmen verwendet. Unter der Umsetzungsintensität ist ein Maßstab für die Tiefe und Breite der erforderlichen Veränderungen sowie die Intensität der diesen entgegenstehenden Hemmnissen zu verstehen (siehe Tab. 1).

4 Modellierungsergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnis der Basisanalysen

Das zentrale Ergebnis der Modellanalyse ist, dass zusätzliche Aufwendungen für Dämmstoffe sowohl ressourcen- als auch emissionsseitig in fast allen Umweltwirkungskategorien durch erhebliche Einsparungen bei der Gebäudebeheizung überkompensiert werden. Im Wesentlichen sind keine Trade-offs erkennbar, und der prozentuale Beitrag der Dämmstoffe an den Umweltwirkungsindikatoren ist gering.

Abb. 2 zeigt hierzu zunächst die Entwicklung des kumulierten Dämmstoffeinsatzes in den vier MaRess-Szenarien (im Basisfall wird der als Linie dargestellte Dämmstoff XPS verwendet). Der mit zunehmender Eingriffstiefe aufgrund von politischen Vorgaben ansteigende Bedarf an Dämmstoffen ist, insbesondere im Szenario *MaRess Leit-Plus*, deutlich zu erkennen.

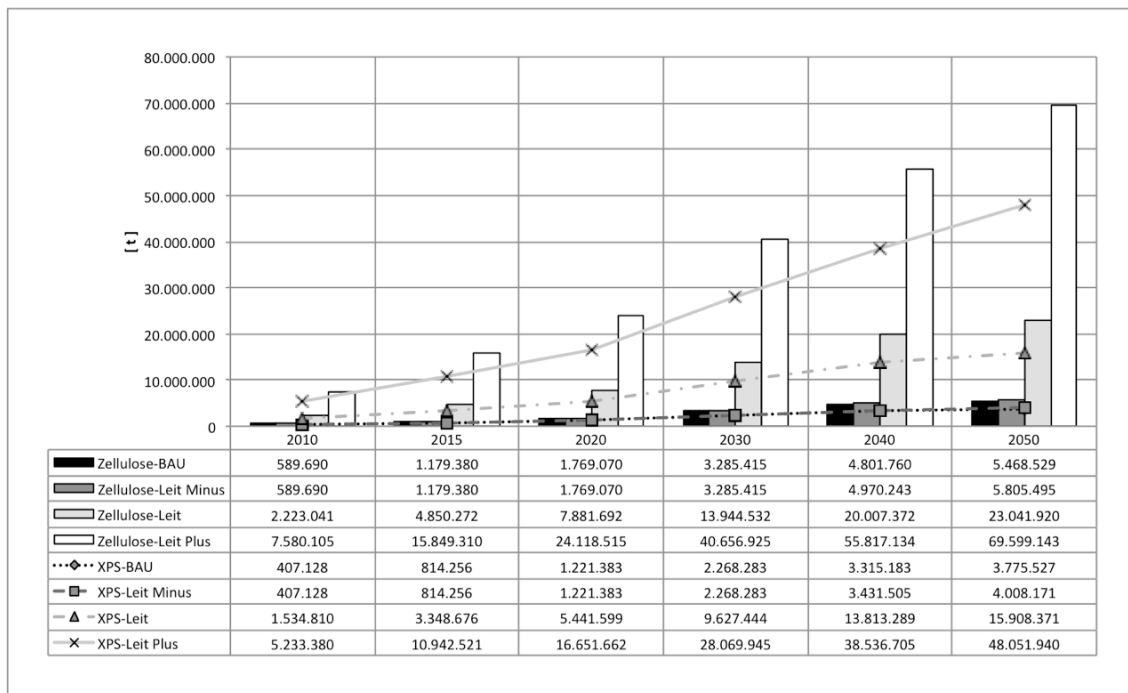


Abb. 2 Kumulierter Einsatz von Dämmstoffen (XPS und Zellulose) in den MaResS-Szenarien *MaResS BAU*, *MaResS Leit-Minus*, *MaResS Leit* und *MaResS Leit-Plus*

In Abb. 3 folgt die Darstellung der aufgrund des Dämmstoffeinsatzes erfolgten Reduktion der Endenergie (Raumwärme inklusive Warmwasser).

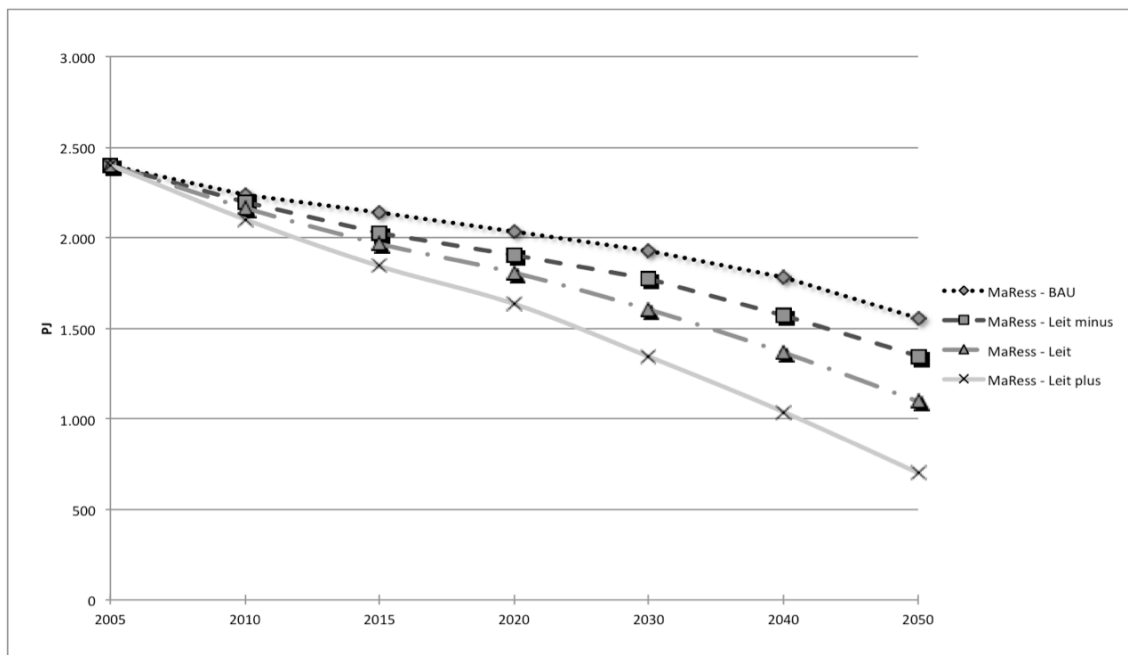


Abb. 3 Vergleich der Endenergienachfrage in den MaResS-Szenarien *BAU*, *Leit-Minus*, *Leit* und *Leit-Plus* für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2050

Im Business-as-usual Pfad (*MaResS BAU*) ist eine Reduktion um 35% bis 2050 möglich. Im Szenario *MaResS Leit-Plus* wirkt sich die Sanierungsqualität (stufenweise Verschärfung der Altbausanierung auf Passivhausstandard) besonders auf den Nutzenergiebedarf aus, so dass ein gleichmäßiger Verlauf von Nutzenergie-, Endenergie und Emissionsreduktion in Verbindung mit dem Einsatz erneuerbarer Energien entsteht. Die forcierte Einsparstrategie führt

nutzenergetisch zu einer Einsparung von 1.250 PJ und einer endenergetischen Einsparung von ca. 1.700 PJ oder 70%.

Dabei ist hervorzuheben, dass die entsprechenden Energieverbrauchsreduktionen zu einem erheblichen Teil durch die Gebäudesanierung selbst ausgelöst werden, während die Substitution und Erneuerung von Heizungsanlagen in den jeweiligen Szenarien eine untergeordnete Rolle spielt. Um nicht das Gesamtergebnis mit ambitionierten Annahmen zu verzerren (der Kern der Untersuchung lag im Bereich der Nutzenergieeinsparung), sind Business-As-Usual-Annahmen für Heizungsanlagen getroffen worden. Lediglich der jetzt gültige rechtliche Rahmen, der für den Betrieb von Heizungsanlagen besteht, musste aus Gründen der inhaltlichen Konsistenz berücksichtigt werden.

Vergleicht man die Entwicklung der Umweltwirkungen entlang der vier Szenarien, so wird deutlich, dass schon im Referenzfall, dem Szenario *MaRess BAU*, ein kontinuierlicher, aber moderater Netto-Rückgang aller betrachteten Wirkungskategorie-Indikatoren in Höhe von jeweils 30-50% bis 2050 im Vergleich zu 2005 zu beobachten ist. Dieser Rückgang steigt erwartungsgemäß bei forcierter Ressourcen- und Klimapolitik mehr und mehr an und erreicht im Szenario *MaRess Leit-Plus* im gleichen Zeitraum 70-90% Netto-Entlastung der meisten Indikatoren. Abb. 4 zeigt hierzu eine auf 100% der Indikatorwerte des Basisjahres normierte Darstellung. Zukünftige jährliche Mehrbelastungen sind *außerhalb*, Minderbelastungen *innerhalb* des Kreises für alle Jahre aufgetragen.

Hier (und auch im hier nicht dargestellten Szenario *Maress Leit*) sind bei drei Umweltwirkungskategorien jedoch zunächst gegenläufige Entwicklungen zu beobachten: Die beiden Wirkungskategorien „Geruch“ und „stratosphärischer Ozonabbau“ steigen bis zum Jahr 2010 zunächst an und gehen erst dann analog zu den anderen Kategorien zurück. Die Wirkungskategorie „Landverbrauch“ steigt bis zum Jahr 2020 an und wird erst danach (leicht) reduziert.

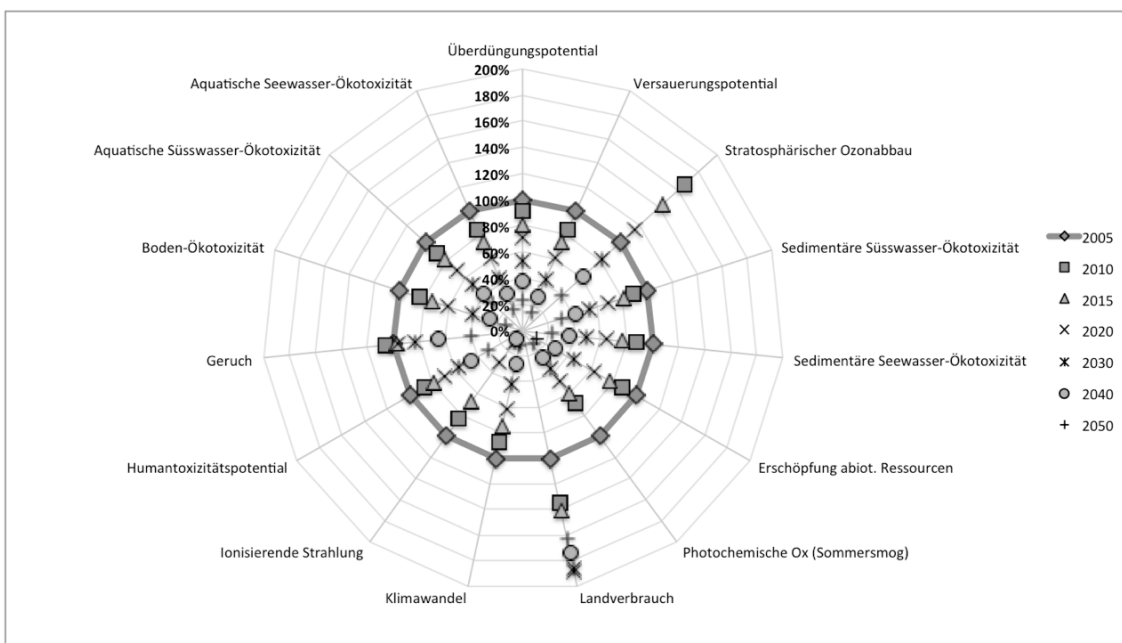


Abb. 4 Relative Entwicklung von CML-Umweltwirkungs-Indikatoren im Szenario *MaRess Leit-Plus* (Heizen & Dämmen)

Dies liegt in folgenden Entwicklungen begründet:

- Der von fossilen Brennstoffen dominierte Indikator „Geruch“ steigt durch zunehmende Biomasse-Anteile im Strommix und regenerative Nahwärme zunächst über den Wert des Basisjahrs an, sinkt bis 2050 aber durch die Einsparung fossiler Heizenergie darunter ab. Die verstärkte Biomassennutzung kann sich auch auf die Feinstaub-Belastung auswirken, die hier aber nicht separat erfasst wird, sondern ein Bestandteil des Indikators „Humantoxizitätspotenzial“ ist.
- Auch der grundsätzlich durch die Nutzung fossil befeuerter Heizungen dominierte Indikator „stratosphärischer Ozonabbau“ steigt auf Grund zusätzlicher prozessbedingter Emissionen der Herstellung von XPS-Dämmstoffen zunächst um über 50% des Werts des Basisjahres 2005 an. Durch die Einsparung von fossiler Heizenergie auf Grund der Dämmung wird dieser Effekt bereits ab 2030 kompensiert, und im weiteren Verlauf sinkt die Belastung bis 2050 deutlich um etwa 60% des Bezugswertes.
- Der Anstieg des Indikators „Landverbrauch“ liegt ebenfalls im zunehmenden Einsatz von Biomasse-Heizungen im Wärmemix begründet. Durch die steigende Nutzung von Biomasse in Pellet- und Stückholz-Heizungen liegt dieser Indikator in 2050 als einziger über dem Basiswert von 2005. Diese Entwicklung ist jedoch unabhängig von Effizienzmaßnahmen zu sehen, da sie auf Szenario-Annahmen zur Deckung des restlichen Wärmebedarfs durch erneuerbare Energien zurück geht. Da bei steigendem Bedarf nach forstlicher Biomasse und begrenztem inländischen Potenzial vermehrt Nutzungskonkurrenzen mit stofflichen Verwendungen und steigende Importabhängigkeiten zu erwarten sind, sollte das Leitszenario des BMU auf der Basis einen umfassenden Biomassekonzeptes und unter Würdigung der in- und ausländischen Flächennutzungen überprüft werden.

Aus Abb. 4 ist ebenfalls ersichtlich, dass auch der Wirkungsindikator „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ trotz massiven Einsatzes von Dämmstoffen kontinuierlich reduziert wird. Abb. 5 zeigt in einer Detailanalyse, welche Prozesse zur Ressourcenerschöpfung beitragen, wiederum am Beispiel des Szenarios *MaRes Leit-Plus*. Danach ist der Anteil des Dämmstoffes XPS mit 3% in 2010 und 10% in 2050 sehr gering – der weit überwiegende Teil der Belastungen resultiert aus der Nutzung fossiler Energiequellen zu Heizzwecken.

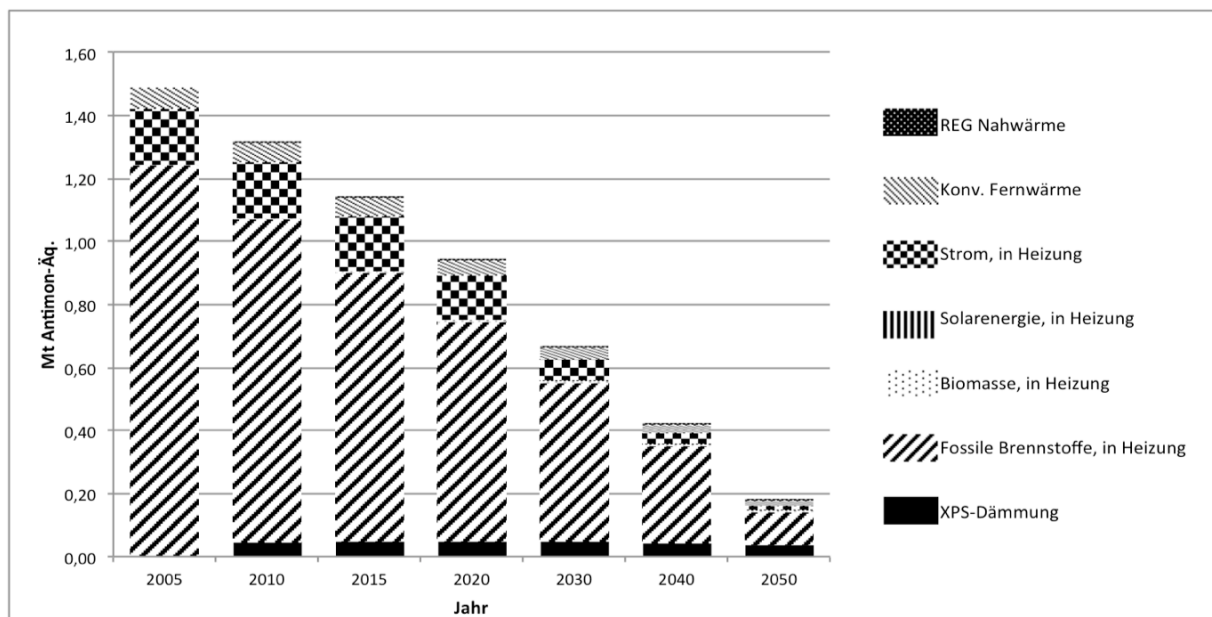


Abb. 5 Absolute Entwicklung des Umweltwirkungs-Indikators „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ im Szenario *MaRes Leit-Plus* (Heizen & Dämmen)

4.2 Ergebnis der Sensitivitätsanalysen

Neben der Basisanalyse werden zwei Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Wahl des Treibmittels und generell die Art des verwendeten Dämmstoffes einschätzen zu können.

Sensitivitätsanalyse 1: Wahl des Treibmittels bei XPS-Dämmstoffen

Relevant ist die Wahl des Treibmittels bei den aufgeschäumten XPS-Dämmstoffen (ohne Abbildung): Für die Basisanalyse wird angenommen, dass 90-96% des verwendeten XPS mittels CO₂ aufgeschäumt wird und der Rest jeweils zur Hälfte durch die Fluorkohlenwasserstoffe FKW 134a und FKW 152a abgedeckt wird. Diese Annahme begründet sich darin, dass die vier Hersteller in Deutschland bereits heute für die Perimeter- und Dachdämmung im Hochbau weitgehend CO₂ einsetzen, während FKW nach Herstellerangaben überwiegend noch für spezielle Anwendungsbereiche wie Kühlfahrzeuge verwendet werden (UBA 2010). Obwohl FKW ein starkes Erderwärmungspotenzial aufweisen und bei Berücksichtigung ihrer Herstellung auch zum Abbau der Ozonschicht beitragen können, sind sie bei der Dämmstoffherstellung in Europa nicht verboten: Der weitgehende Verzicht in Deutschland beruht auf Selbstverpflichtungen der Industrie. Statistische Daten für die weltweite Produktion sind kaum verfügbar, jedoch wurden nach UNEP 2006 in 2005 60% der in Europa produzierten XPS-Platten mit FKW aufgeschäumt, während diese Treibmittel-Gruppe noch heute insbesondere in Nordamerika im Hochbau Anwendung findet. Um auch die Möglichkeit einer importbedingten verstärkten Nutzung FKW-geschäumter XPS-Platten zu berücksichtigen, wird daher in einer Sensitivitätsanalyse eine Treibmittel-Zusammensetzung von 50% CO₂ und jeweils 25% FKW 134a und FKW 152a angenommen. Im Endergebnis führt dies zu einem erheblichen Trade-off bezüglich der Wirkungskategorie „stratosphärischer Ozonabbau“: Die Belastung durch die Dämmung übersteigt die Entlastung durch die entsprechende Energieeinsparung um 500% in 2015 und geht auf 368% in 2050 zurück.

Die relativen Veränderungen weiterer Indikatoren im Vergleich zur Basisvariante des Szenarios *MaRess Leit-Plus* sind dagegen marginal. Dies trifft auch auf den Indikator „Klimawandel“ zu: Die Treibhausgas-Emissionen der XPS-Herstellung fallen in der relativen Betrachtung im Vergleich zu Emissionen der Gebäudebeheizung nur wenig ins Gewicht. Dennoch zeigt die Darstellung der absoluten CO₂-Äquivalente des Systems einen deutlichen Zuwachs der Sensitivität: Die XPS-Herstellung leistet hier zum Indikatorwert einen maximalen Beitrag von 12,7 Mt CO₂-Äq. in 2015 im Vergleich zu 5,7 Mt in der Basisvariante von *MaRess Leit-Plus*. Die Treibmittel-Auswahl ist deshalb grundsätzlich auch aus Perspektive des Klimaschutzes von Bedeutung.

Sensitivitätsanalyse 2: Ersatz des Dämmmaterials XPS durch Zellulose

In einer zweiten Sensitivitätsanalyse wird das alternative Dämmmaterial Zellulose (aus Altpapier) verwendet. Wie in Abb. 2 bereits erkennbar, ist einerseits – bei gleichem Wärmedämmstandard – ein erheblicher Mehrverbrauch von Zellulose im Vergleich zu XPS zu verzeichnen, da XPS eine wesentlich geringere Dichte als Zellulose aufweist. Die Ökobilanzergebnisse zeigen jedoch, dass sich die an sich schon geringen Anteile der Dämmstoffe an den Wirkungsindikatoren weiter verringern.

Betrachtet man neben den Wirkungsindikatoren aus der Ökobilanzierung auch das Ressourcenindikatoren-Set MIPS, so wird deutlich, dass XPS- und Zellulose-Dämmung mit vergleichbaren Auswirkungen auf die Materialintensität verbunden sind. Die kumulierten Nettoeffekte, die sich hier aus dem Dämmstoffeinsatz in Gegenüberstellung mit der Einsparung von Hei-

zenergie ergeben, werden in Abb. 6 dargestellt. Sie umfassen eine Abschätzung der Salden des Primärenergieaufwandes, der Treibhausgasemissionen sowie des Bedarfs an Wasser, biotischen und abiotischen Rohstoffen. Die negativen Indikatorwerte zeigen dabei an, dass durch die Dämmwirkung und den damit verbundenen starken Heizenergierückgang in beiden Fällen die Material-Mehrverbräuche durch die Einsparungen überkompensiert werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ambitionierte Dämmstoffstrategien sowohl mittels XPS als auch Zellulose im Hinblick auf alle in diesem Arbeitsschritt analysierten Faktoren einen wesentlichen Beitrag sowohl zu Materialeffizienz- als auch zu Emissionsminderungszielen leisten.

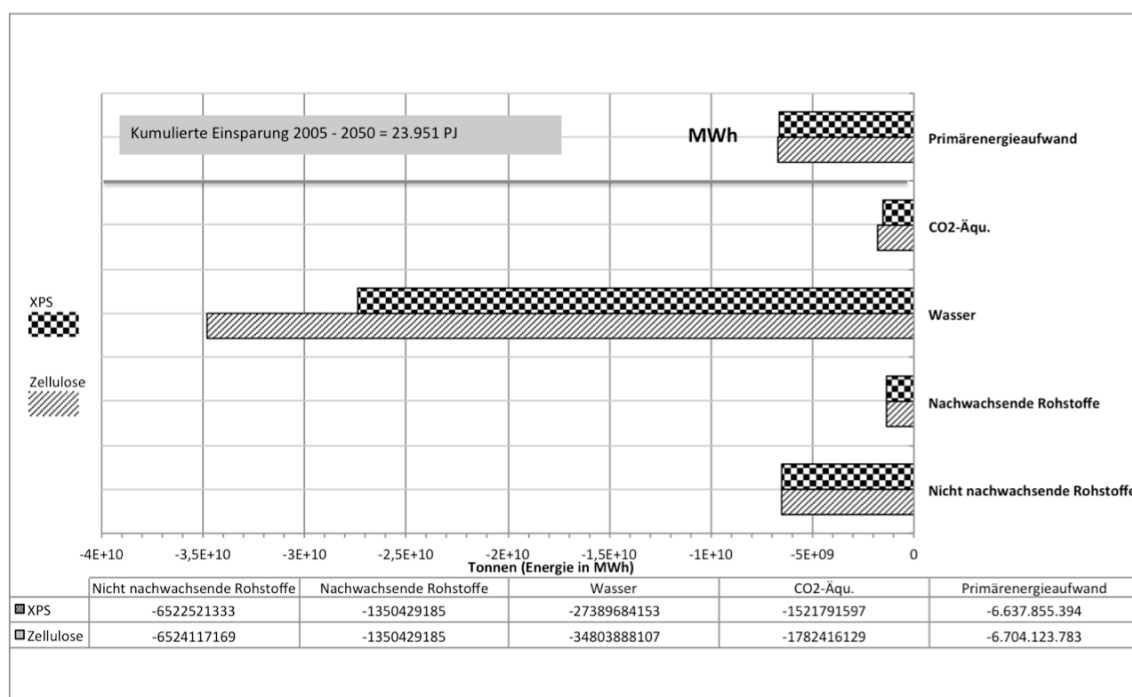


Abb. 6 Ergebnisse der Trade-off Analyse (Dämmstoffeinsatz versus Einsparungen bei der Heizenergie) der Dämmstoffvarianten XPS und Zellulose im Szenario *MaRess Leit-Plus* (negative Werte bedeuten eine Netto-Einsparung)

Grundsätzlich können sich bei der Verwendung holzbasierter Dämmstoffe Konkurrenzsituationen ergeben. Im Fall der Zellulose wäre aber selbst bei einer Vollsanierung bis 2050 ausschließlich auf Basis dieses Dämmstoffes gemäß Abb. 2 mit einem Aufwand von durchschnittlich etwa 1,2 Millionen Tonnen Altpapier pro Jahr zu rechnen. Dies entspricht ca. 8% des inländischen Altpapieraufkommens in 2007 von 15,4 Millionen Tonnen (VDP 2010). In einem realitätsnahen Dämmstoffmix sind Nutzungskonkurrenzen mit der Recyclingpapier-Herstellung und indirekte Flächenkonkurrenzen um forstliche Ressourcen daher eher als gering einzuschätzen, aber dennoch im Rahmen der Festlegung einer Dämmstoffstrategie zu prüfen.

4.3 Übertragbarkeitsanalyse

Die abschließend durchgeführte Übertragbarkeitsanalyse (siehe Hanke et al. 2010 für Details) zeigt schließlich, dass das hier entwickelte Modell unter zwei Voraussetzungen auf andere Bedarfsfelder übertragbar ist: Einerseits müssen messbare Indikatoren zur Verfügung stehen, mit denen die Wirkung von Politikinstrumenten abgebildet werden kann. Andererseits muss für das jeweilige Bedarfsfeld ein Technikmodell einsatzbereit sein, mit dem Veränderungen der gewählten Indikatoren im Zeitablauf szenarienmäßig berechnet werden können. Dies ist bei-

spielsweise im Bedarfsfeld „Mobilität und Verkehr“ mit dem TREMOD-Modell des Bundesverkehrsministeriums („Transport Emission Model“, siehe ifeu 2010) gegeben, während im Bedarfsfeld „Ernährung“ mit einem Zusatzaufwand für die Bestimmung von Indikatoren und die Entwicklung von Modellen zu rechnen ist.

5 Schlussfolgerungen und Politikempfehlungen

Die beschriebene Modellierung hat eine Vielzahl neuer Erkenntnisse gebracht. Die drei zentralen Ergebnisse auf methodischer Seite sind

1. die Entwicklung des Bottom-up Wirkungsanalyse-Modells und die beispielhafte Anwendung auf das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“,
2. die erstmals durchgeführte Trade-off Analyse zwischen Effizienzsteigerung, Ressourcenverbrauch und Emissionswirkungen und
3. die dadurch möglich gewordene Erweiterung „reiner“ Energieszenarien um ressourcenpolitische Analysen.

Das zentrale Ergebnis der Modellanalyse ist, dass zusätzliche Aufwendungen für Dämmstoffe sowohl ressourcen- als auch emissionsseitig in fast allen Umweltwirkungskategorien durch erhebliche Einsparungen bei der Gebäudebeheizung überkompensiert werden. Im Wesentlichen sind keine Trade-offs erkennbar, und der prozentuale Beitrag der Dämmstoffe an den Umweltwirkungsindikatoren ist gering. Relevante Auswirkungen sind nur im Fall erhöhter Anteile von Biomasse-Heizanlagen erkennbar, da eine verstärkte Biomassenutzung negative Auswirkungen auf den Indikator für Flächenverbrauch hat.

Vergleicht man die Entwicklung der Umweltwirkungen entlang der vier Szenarien, so wird deutlich, dass schon im Referenzfall, dem Szenario *MaRess BAU*, ein kontinuierlicher, aber moderater Netto-Rückgang aller betrachteten Wirkungskategorie-Indikatoren in Höhe von jeweils 30-50% bis 2050 im Vergleich zu 2005 zu beobachten ist. Dieser Rückgang steigt erwartungsgemäß bei forcierter Ressourcen- und Klimapolitik mehr und mehr an und erreicht im Szenario *MaRess Leit-Plus* im gleichen Zeitraum 70-90% Netto-Entlastung.

Relevant ist die Wahl des Treibmittels bei den aufgeschäumten XPS-Dämmstoffen: Gegenüber dem in Deutschland verwendeten XPS führt ein XPS-Dämmstoff, der sich aus 50% CO₂ und 50% Fluorkohlenwasserstoffen (FKW) zusammensetzt, zu einem erheblichen Trade-off bezüglich der Wirkungskategorie „stratosphärischer Ozonabbau“ und zu einer erkennbaren, jedoch nicht so deutlichen Wirkung auf das Treibhaus-Potenzial.

Die Sensitivitätsanalyse mit dem alternativen Dämmmaterial Zellulose hat gezeigt, dass sich die an sich schon geringen Anteile der Dämmstoffe an den Wirkungsindikatoren weiter verringern. Erweitert man diese Betrachtung der Ökobilanzierung auf das Ressourcenindikatoren-Set MIPS, so wird deutlich, dass XPS- und Zellulose-Dämmung mit vergleichbaren Auswirkungen auf die Materialintensität verbunden sind. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für beide Materialien ambitionierte Dämmstoffstrategien im Hinblick auf alle in dieser Studie analysierten Faktoren einen wesentlichen Beitrag sowohl zu Materialeffizienz- als auch zu Emissionsminderungszielen leisten können.

Die berechneten Materialintensitäten sind jedoch nur als erste Analyse zu verstehen. Für eine umfassende Bewertung sind eine einheitliche Produkt-Datenbasis mit aktualisierten, reviewten und auf die Zukunft fortschreibbaren Datensätzen und Indikatoren notwendig. Die Einbettung

eines umfassenden Ressourcenindikators in das etablierte Instrumentarium der Szenarien- und Stoffstromanalyse ist eine weitere Herausforderung, die innerhalb dieses Pilotprojekts deutlich wurde und die aufgrund der begrenzten zeitlichen Kapazität nicht gelöst werden könnten. Zudem wurde deutlich, dass hinsichtlich der Verbindung der Szenarienentwicklung und der Stoffstrommodellierung mit der Konkretisierung von wohnraumspezifischen Instrumenten weiterer Forschungsbedarf besteht.

Da die energetischen Ressourcen jedoch einen wesentlichen Anteil an den Umweltauswirkungen des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“ haben, konnte in einem ersten Schritt die detaillierte Modellierung energie- und klimapolitischer Ansätze in Verbindung mit einer Ressourcenpolitik (insbesondere im Hinblick auf die Gebäudedämmung) durchgeführt werden. Dies stellt eine erhebliche Erweiterung bisheriger „reiner“ Energieszenarien dar, die nicht auf die Ressourcenseite fokussiert sind und in der Regel emissionsseitig nur Treibhausgasemissionen betrachten.

Die dargestellten Ergebnissen führen zu folgenden Politikempfehlungen:

- Energieeinspar- und Effizienzstrategien, wie sie in den verwendeten MaRess-Szenarien, die auf dem BMU-Leitszenario 2008 aufbauen, modelliert wurden, sollten zügig umgesetzt werden. Entsprechende politische Vorgaben hätten eine positive Wirkung auf fast alle Umweltwirkungskategorien, insbesondere den stofflichen Ressourcenverbrauch und fast alle Emissionsindikatoren.
- Der erhöhte Flächenverbrauch, der sich (indirekt) aus der Zunahme von Biomasse-Heizanlagen ergibt, sollte bei der Umsetzung einer Erneuerbare-Energien-Strategie bedacht werden. Hierzu bedarf es einer umfassenden Biomassestrategie, die den Einsatz für Ernährung, Materialien und Energie gemeinsam betrachtet und die inländische und ausländische Flächennutzung berücksichtigt.
- Aufgrund des erheblichen Trade-offs, der sich ergibt, wenn der Dämmstoff XPS nicht mit CO₂, sondern mit FKW aufgeschäumt wird, sollte industriepolitisch auf eine weitere Reduktion der FKW in Dämmstoffen hingewirkt werden. Während in Deutschland bereits weitgehend CO₂ verwendet wird (angenommen wurde ein Anteil von 90-96%), besteht sowohl in anderen europäischen Ländern als auch insbesondere in Nordamerika noch verstärkter Handlungsbedarf, die Nutzung technisch gleichwertiger und ökologisch verträglicherer Alternativen zu fördern.
- Nicht nur bei Dämmstoffen, sondern generell bei Baustoffen sollten vertieft die Ressourcenauswirkungen ihrer Herstellung analysiert werden und in industriepolitische Instrumente einfließen. Bereits ein erster, grober Vergleich des Dämmstoffs XPS mit Zellulose auf Basis des MIPS-Indikatorensets hat gezeigt, dass mit Zellulose eine deutliche Ressourceneinsparung erreicht werden kann.
- Es sollte darauf hingewirkt werden, dass ein standardisierbarer Bilanzierungsansatz entwickelt wird, der die Ökobilanz-Methodik mit umfassenden stofflichen Ressourcenindikatoren koppelt. Weiterhin sollten aktuelle, harmonisierte, reviewte und fortschreibbare Datensätze bereit gestellt werden.

Danksagung

Das Forschungsprojekt „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes), in dem die dargestellten Ergebnisse erarbeitet wurden, wurde dankenswerterweise vom Bundesministerium für Umwelt (BMU) und vom Umweltbundesamt (UBA) im Rahmen des UFOPLANs gefördert (Förderkennzeichen 3707 93 300).

Literatur

- Acosta-Fernandez J, Bleischwitz R, Krause M, Ritthoff M, Scharp M, Stürmer M, Wiltz H et al. (2009) Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung; Teilvorhaben 1: Potenzialermittlung, Maßnahmenvorschläge und Dialog zur Ressourcenschonung. Forschungsprojekt von Wuppertal Institut und Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin
- BMU (2008) Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas; Leitstudie 2008. Berlin
- DIN (2006a) Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)
- DIN (2006b) Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitung (ISO 14044:2006)
- Guinée J B (Hrsg.) (2002) Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards; Band 7; Eco-efficiency in industry and science. Dordrecht u.a.: Kluwer Academic Publishers
- Hanke T, Fishedick M (2004) Das Wuppertal Modell-Instrumentarium. In: Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland (Hg.) Energiemodelle zum Klimaschutz in liberalisierten Energiemärkten, 1. Aufl. Lit Verlag, Münster
- Hanke T, Soukup O, Viebahn P, Fishedick M. (2010) Ressourceneffizienzpaper 6.3 „Übertragbarkeit des Bottom-Up Wirkungsanalyse - Modells auf andere Bedarfsfelder“. Wuppertal Institut. Wuppertal. <http://ressourcen.wupperinst.org/?id=274>. Gesehen 10. Juli 2011
- Hennicke P, Kristof K, Götz T (Hrsg.) (2011) Aus weniger mehr machen. Strategien für eine nachhaltige Ressourcenpolitik in Deutschland. Oekom, München
- IER, RWI, ZEW (2009) Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 (Energieprognose 2009). Unveröffentlicht
- ifeu (2010) Fortschreibung und Erweiterung: Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMOT, Version 5). Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg
- Öko-Institut, prognos (2009) Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Studie im Auftrag von WWF Deutschland. Berlins
- UBA (2010) Fluorierte Treibhausgase vermeiden. Wege zum Ausstieg. <http://www.uba.de/uba-info-medien/3962.html> Gesehen 31. August 2011
- UNEP (2006) Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. 2006 Report of the Rigid and Flexible Foams Technical Options Committee. http://www.unep.org/teap/Reports/FTOC/ftoc_assessment_report06.pdf Gesehen 31. August 2011
- VDP [Verband Deutscher Papierfabriken] (2010) Papier Recyclen. <http://www.vdp-online.de/pdf/Papierrecyclen.pdf>. Gesehen 24. September 2010